

# 垂直磁気記録単磁極ヘッドの記録磁界解析

金井 靖<sup>1)</sup>, Simon J. Greaves<sup>2)</sup>, 吉田和悦<sup>3)</sup>, 山川清志<sup>4)</sup>  
青井 基<sup>2)</sup>, 村岡裕明<sup>2)</sup>, 中村慶久<sup>2)</sup>

1) 新潟工科大学, 2) 東北大学, 3) 工学院大学, 4) 秋田県高度技術研究所

## Recording Field Analysis of Single-Pole-Type Head

Yasushi Kanai<sup>1)</sup>, Simon J. Greaves<sup>2)</sup>, Kazuetsu Yoshida<sup>3)</sup>, Kiyoshi Yamakawa<sup>1)</sup>,  
Hajime Aoi<sup>2)</sup>, Hiroaki Muraoka<sup>2)</sup>, and Yoshihisa Nakamura<sup>2)</sup>

1) Niigata Institute of Technology, 2) Tohoku University, 3) Kogakuin University,  
4) Akita Research Institute of Advanced Technology

**Abstract**— In the first half, recording fields of single-pole-type head were derived by using FEM simulations, then, various media were considered and written track widths, erase bands, SNR's, and written bit patterns were derived from Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) simulations. In the second part, full LLG calculations considering the SPT head with side shields and double-layered medium were carried out and the magnetization patterns and the recording fields were derived.

### 1 はじめに

垂直磁気記録方式を採用した磁気ディスク装置の世界初の商品化が発表された[1]. 面記録密度は 133 Gb/in<sup>2</sup> とされ, 市販の面内磁気記録ドライブで達成されている最大面密度 108 Gb/in<sup>2</sup> [2] を超え, 世界最高水準を達成している. また, 面内記録方式のドライブに TMR (tunneling magnetoresistive)ヘッドが搭載された[2]. これらは新しいテクノロジーの実現という面から, 明るいニュースと思われる.

現在, 磁気記録の記録密度向上の観点からボトルネックとなっているのは, 記録方式によらず, 記録ヘッドとされている[3], [4]. S/Nを確保しつつ面記録密度を向上させるためには微小なグレインの媒体が必要であり, 媒体グレインを小さく

した上で熱磁気緩和を避けるためには高い異方性エネルギーが求められる. 高い異方性エネルギーの媒体は高い異方性磁界を有するから結果として保磁力が高くなり, 飽和記録が困難になる. 記録ヘッドの記録磁界強度の上限は材料の飽和磁束密度で決まるが, 材料面では既に飽和磁束密度の理論的な限界である 24kG 以上に達している[5]. また, 構造によっては飛躍的に記録磁界強度を高めることは困難であるとされる.

筆者らは CF-SPT (cusp-field single-pole-type)ヘッド[6]を基にテーパーのある主磁極とトレーリングシールド[7], [8]およびサイドシールド[7]をもつ SPT ヘッドを提案した[9]. 本構造は将来のプロセスに期待すべく意欲的なものであるが, 強い記録磁界, 急峻な記録磁界勾配, 隣接トラックへの漏れ磁界を抑えることができる. さらに, ABS(air bearing surface)に露出する主磁極の面積が小さいことからスキューの問題も軽減できる可能性があることをヘッド磁界分布より述べた.

本報告では, まず, これまでに提案した構造をもとに, 有限要素法[10]による CF-SPT ヘッド磁界計算と媒体の LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert)マイクロマグネティクス計算を用いて, 面記録密度 400 Gb/in<sup>2</sup> およびそれ以上における記録トラック幅, サイドイレーズ幅, S/Nを導出する. 我々は 400 Gb/in<sup>2</sup> の技術は 1 Tb/in<sup>2</sup> 記録へのマイル

ストーンと位置付けており、この密度でのさまざまな問題点の抽出と解決を試みる。なお、ヘッドおよび媒体の系全体をマイクロマグネティクス解析する手法[11], [12], [13]も提案されているが、ここでは従来の有限要素法を用いてヘッド記録磁界を求め、媒体残留磁化計算に LLG マイクロマグネティクス計算を用いる。これによって、複雑な SPT ヘッド形状および十分な分解能をもった媒体を取り扱い可能であると思われる。また、有限要素計算によりスキューを考慮し、ディスクリートトラック媒体を導入した場合の効果についても検討した。

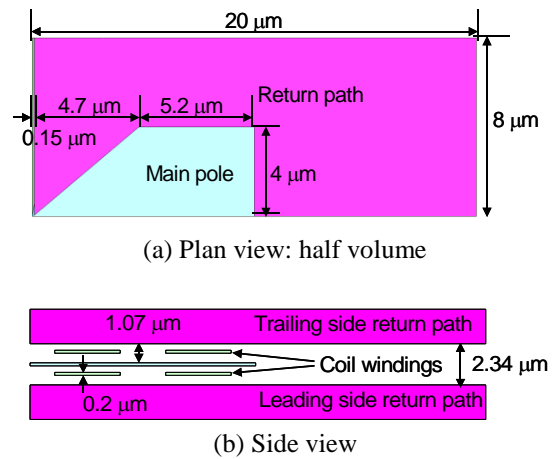
次に、構造を単純化した SPT ヘッドおよび 2 層媒体の系全体をモデル化し、LLG マイクロマグネティクス計算を行い、サイドシールドの構造による記録磁界の時間応答、隣接トラックへの漏れ磁界などを求めたので報告する。

## 2 400 Gb/in<sup>2</sup>を仮定した SPT ヘッドの有限要素記録磁界計算 [14]

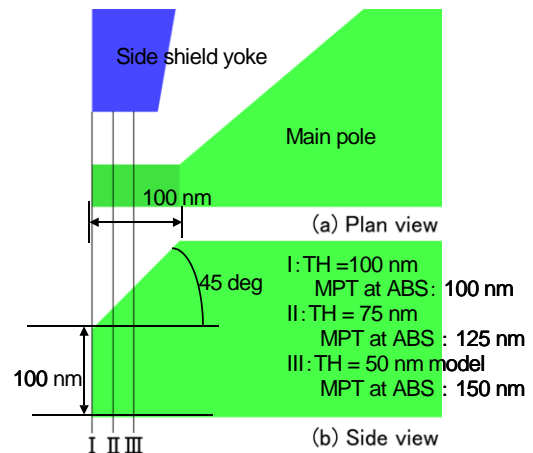
記録密度を仮定し、トラック密度と線記録密度を算出する方法は[15], [16]に詳しいが、400 Gb/in<sup>2</sup>を仮定した場合には、例えば 1) 230 ktpi x 1739 kbp (bit aspect ratio: BAR = 7.56), 2) 280 ktpi x 1429 kbp (BAR = 5.10)となる。これらの磁気記録幅はそれぞれ 96 nm および 79 nm となり飽和記録に必要な磁界強度はそれぞれ 18.7 kOe (1739 kbp : 1848 kfc, 16/17 符号化利用時) および 14.6 kOe (1429 kbp, 1518 kfc)と算出される[15]。一方、この段階では、例えば 60 nm なる主磁極ポール幅の SPT ヘッドを用いたときに、実際に磁気記録幅がどの程度になるかは予測できない。そのため、ポール幅を 60, 70, 80, および 96 nm と仮定して有限要素計算を行う。

### 2-1 計算に用いたモデル

図 1 に CF-SPT ヘッドの模式図を示す。また、主磁極先端構造およびサイドシールド配置の概念図を図 2 に示す。同図に示すように、強い記録磁界を確保するために主磁極のテーパ部分に常に ABS に露出する構造[17]としている。表 1 および 2 に 400 Gb/in<sup>2</sup>を仮定した CF-SPT ヘッドと媒体の諸元を示す。本報告では、断らない限り記録磁界分布は媒体記録層の厚さ方向の中央 (ABS から 12, 16.5, および 28 nm の位置) にて観測する。



**Fig. 1** Schematic structure of a CF-SPT head. Half volume is shown.



**Fig. 2** Arrangement of the main pole and side shield yoke. Half volume is shown.

**Table 1** Major Specifications for 400 Gb/in<sup>2</sup> SPT Heads

Main pole	Width at ABS	60, 70, 80, 96 nm
	Throat height	50, 75, 100 nm
Recording-layer	Permeability	1 (linear)
Soft under-layer	Thickness	200 nm
	Saturation	12 kG
	Permeability	1000 (nonlinear)
MP-side shield	spacing	30, 35, 40, 48, 60 nm

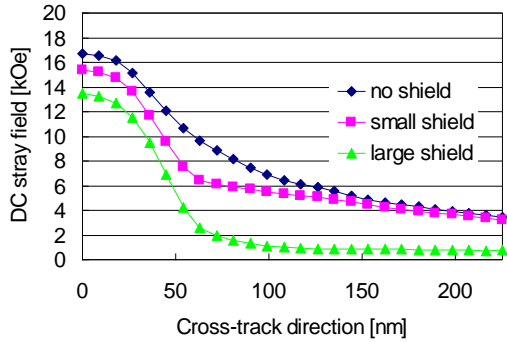
**Table 2** Head-medium specifications (dimensions)

Magnetic spacing (ABS - medium surface)	9 nm	12 nm	20 nm
Recording layer	6 nm	9 nm	16 nm
Inter-layer	0	4 nm	0
ABS-SUL spacing total	15 nm	25 nm	36 nm
Observation point from ABS	12 nm	16.5 nm	28 nm

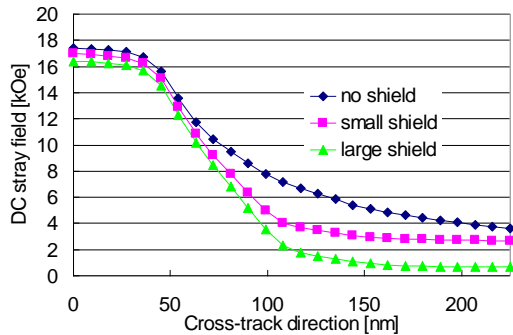
## 2-2 得られた記録磁界分布

まず、起磁力  $MMF$ (magnetomotive force)を変えて記録磁界強度を求め、 $MMF=0.3AT$  で飽和することを確認したので、特に断らない限り、 $MMF=0.3AT$  の結果を示す。また、記録磁界強度として磁界の絶対値あるいはeffective field [18]なる考え方があるが、本報告では記録磁界強度の垂直成分を用いる。換言すれば、有限要素計算で得た3成分全てがLLG計算に用いられるので、問題は生じ得ない。

図3にサイドシールドの有無と大きさによる隣接トラックへの漏れ磁界の抑制効果を示す。なお、small shieldはダウントラック方向に100 nmの厚さでトレーリングエッジ周辺のみで漏れ磁界を抑え、large shieldは1500 nmの厚さで隣接トラック全体への漏れ磁界を抑えることを考えている。図3から分かるように、ポール幅  $T_w$  が96 nmのときには、large shieldを用いれば隣接トラックへの漏れ磁界を効果的に抑制することができ、また、記録トラック中心で記録磁界強度の低下が少ない。一方、 $T_w = 60$  nmの場合には隣接トラック

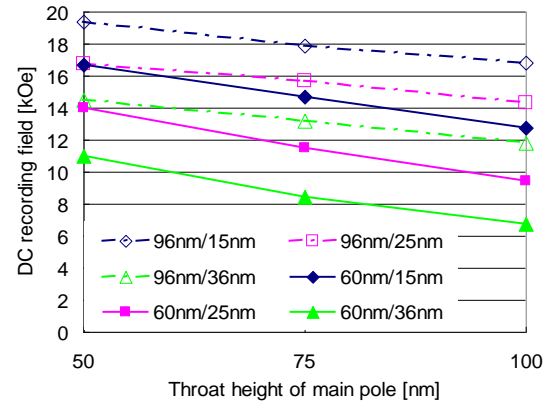


(a)  $T_w = 60$  nm, MP-side shield distance = 30 nm

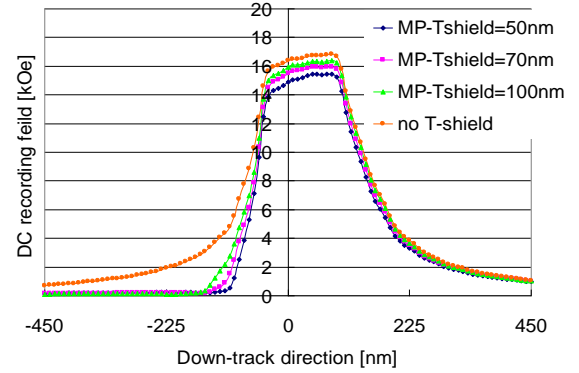


(b)  $T_w = 96$  nm, MP-side shield distance = 60 nm

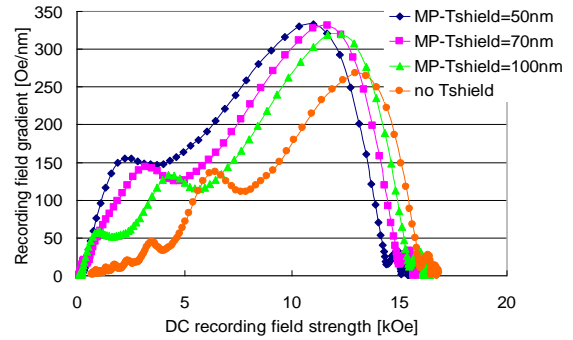
**Fig. 3** DC stray field distributions for SPT heads with various side shield sizes. ABS-SUL spacing = 25 nm,  $TH = 50$  nm,  $MMF = 0.3$  AT.



**Fig. 4** Perpendicular component of DC recording field vs. throat height of main pole for various main pole widths/ABS-SUL spacings. Large side shields,  $MMF = 0.3$  AT.

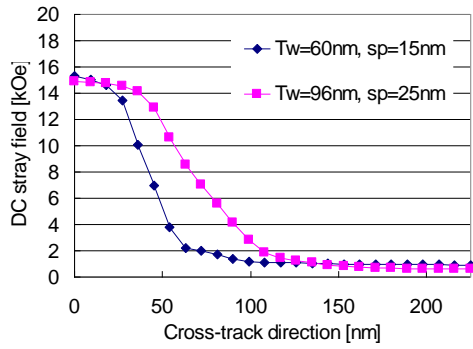


(a) Perpendicular component of DC recording field distribution along the down track direction



(b) Recording field gradient vs. DC recording field strength

**Fig. 5** DC recording field distributions along the down-track direction and recording field gradient for various main pole tip - trailing shield distances.  $T_w = 96$  nm, large side shields, ABS-SUL spacing = 25 nm,  $TH = 50$  nm,  $MMF = 0.3$  AT.



**Fig. 6** DC recording field distributions along the cross-track directions for  $T_w = 96$  nm, ABS-SUL spacing = 25 nm and  $T_w = 60$  nm, ABS-SUL spacing = 15 nm. Large side shields and a trailing shield were modeled.  $TH = 50$  nm,  $MMF = 0.3$  AT.

への漏れ磁界を抑えることはできるが、シールドによる記録磁界強度の低下が大きい。

図4にはポール幅とABS-SUL(soft under-layer: 媒体裏打層)距離をパラメータとしたときの記録磁界強度の主磁極スロートハイトへ $TH$ の依存性を示す。これから分かるように、 $T_w = 96$  nmよりも $T_w = 60$  nmの方が $TH$ に対して敏感に記録磁界強度が変化する。また、ABS-SUL距離が36 nmの場合はいずれのポール幅でも記録磁界強度が不足すると思われる。

図5に示すように、トレーリングシールドにより記録磁界の絶対値は低下するが、記録磁界急峻度は増加する。ただし、主磁極とトレーリングシールドの距離を50 nm以下にしても急峻度は大きくならず、強度が低下するので好ましくない。

ところで、サイドシールドおよびトレーリングシールドはトラック密度および線記録密度を向上する観点からは効果があると思われるが、記録磁界の絶対値が低下することは避けられない。図6に2種類のABS-SUL距離/ポール幅の組み合わせに対する記録磁界分布を示す。これから分かるように、ヘッドのパラメータではないが、ABS-SUL距離を小さくすることは強い記録磁界を得る観点からは大きな効果があると思われる。

### 3 400 Gb/in<sup>2</sup>を仮定したLLG媒体磁化計算[19]

#### 3-1 LLG計算の条件

前節の有限要素計算により得られた記録磁界分布を用いて、LLGマイクロマグネティクス計算より媒体残留磁化を求め、記録トラック幅、

**Table 3** Medium parameters used for the LLG micromagnetic calculations

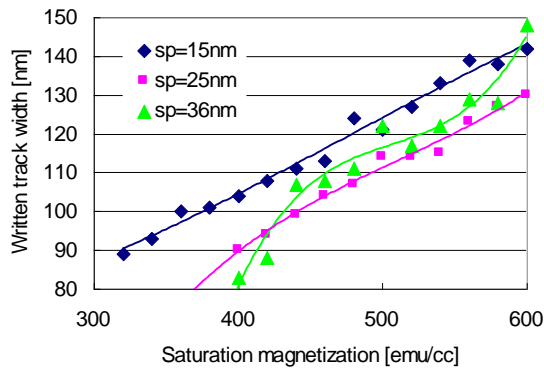
Average grain size	8 nm
Grain size dispersion	1.1 nm
Saturation magnetization $M_s$	300-1100 emu/cc
Exchange coupling $A$	$0.1 \times 10^{-7}$ erg/cm
Anisotropy energy $K_u$	$3.5 \times 10^6$ erg/cc
Easy axis dispersion	5 degrees

サイドイレース幅、およびS/Nを導出する。表3には1 Tb/in<sup>2</sup>条件の媒体[20]を元に仮定した主要諸元を示す。媒体はボロノイセルを使用して表現し、異方性エネルギー、交換エネルギー、静磁エネルギー、および外部磁界であるヘッド磁界を考慮し、記録ヘッドと媒体(記録層,裏打層)の相互作用は無視した。ヘッド-媒体の相対速度を33 m/sと仮定した。記録されたトラックは、例えばMRヘッド出力ではなく、媒体磁化そのものを評価した。なお、計算条件などの詳細は文献[19]を参照されたい。

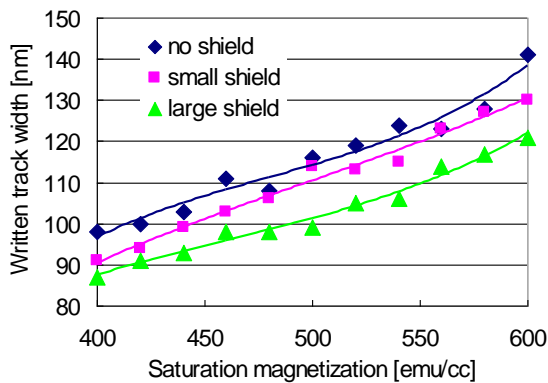
#### 3-2 LLG計算結果

図7にヘッドABS-SUL距離 $sp$ による磁気記録幅を示す。ここで、 $sp$ により最適な $K_u$ の値を用いているが、 $sp = 25$  nmは許容できる一方、 $sp = 36$  nmは有限要素計算でも述べたように、媒体飽和磁化が小さい領域( $H_k = 2K_u/M_s$ より $H_k$ が大きい領域)で特に飽和記録が困難になっている。 $T_w = 96$  nmであることに注意されたい。次に、図8にシールドの有無と大きさによる磁気記録幅を示す。サイドシールドは効果がない[21]との報告もあるが、同図から分かるように、サイドシールドによって記録トラック幅を狭くすることが可能である。特に、large shieldを用いた場合にはシールド無しの場合に比べ10–15 nm記録トラックを狭くすることが可能である。図9には総トラック幅として磁気記録幅とサイドイレース幅の和をとって示した。同図から分かるように、主磁極ポール幅に比べ、総トラック幅は30–40 nm広いことが分かる。表4にはS/N、総トラック幅、および得られた面記録密度を示す。これらから分かるように、たとえば400 Gb/in<sup>2</sup>なる密度を目標とするのであれば、ポール幅およびABS-SUL距離をそれぞれ70–80 nmおよび25 nmにとればよいと思われる。また、ポール幅と同時にABS-SUL距離が総トラック幅を狭くするために大きな要因

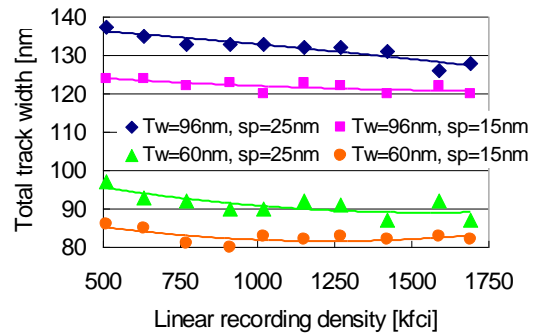
であることが明らかである．一方，S/N の面からは ABS-SUL 距離を小さくすることが必ずしも有効とはなっていない．これは仮定した 8 nm なる媒体粒径が 1693 kfc i では十分に小さいとは言えないためと思われる．すなわち，図 10 に示すように，低線記録密度においては ABS-SUL 距離により S/N の値が顕著に違うが，密度が上がるにつれその差が小さくなる．高密度においても十分な S/N を確保するためには，さらに粒径の小さな記録媒体を用いる必要があるが，熱緩和の問題が顕在化することが懸念される．



**Fig. 7** Written track widths vs. saturation magnetization of the media for various head ABS - SUL spacings.  $T_w = 96$  nm, small side shields,  $TH = 50$  nm,  $MMF = 0.3$  AT,  $A = 1 \times 10^{-7}$ ,  $K_u = 4.6 \times 10^6$  erg/cc (ABS - SUL spacing = 15 nm, 25 nm),  $K_u = 3.2 \times 10^6$  erg/cc (ABS - SUL spacing = 36 nm). Linear density = 846.7 kfc i.



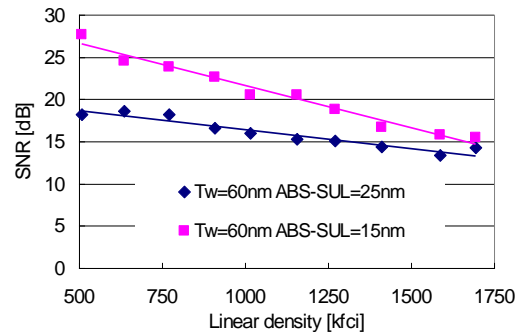
**Fig. 8** Written track widths vs. saturation magnetization of the media for SPT heads with various side shield sizes.  $T_w = 96$  nm,  $TH = 50$  nm, ABS - SUL spacing = 25 nm,  $MMF = 0.3$  AT,  $A = 1 \times 10^{-7}$ ,  $K_u = 4.6 \times 10^6$  erg/cc. Linear density = 846.7 kfc i.



**Fig. 9** Total written track width vs. linear density for various conditions. Large side shields, MP - trailing shield distance = 50 nm,  $TH = 50$  nm,  $MMF = 0.3$  AT,  $A = 1 \times 10^{-7}$  erg/cm.

**Table 4** Total written track widths, areal densities, and SNR's at 1693 kfc i for two track width and two ABS-SUL spacings ( $HSS$ 's). Average of three runs, 40 nm read track width.

MP width [nm]	HSS [nm]	Total width [nm]	Areal density [Gb/in <sup>2</sup> ]	SNR [dB]
96	25	128	336	17.5
96	15	120	358	17.8
60	25	87	494	14.3
60	15	82	525	15.5



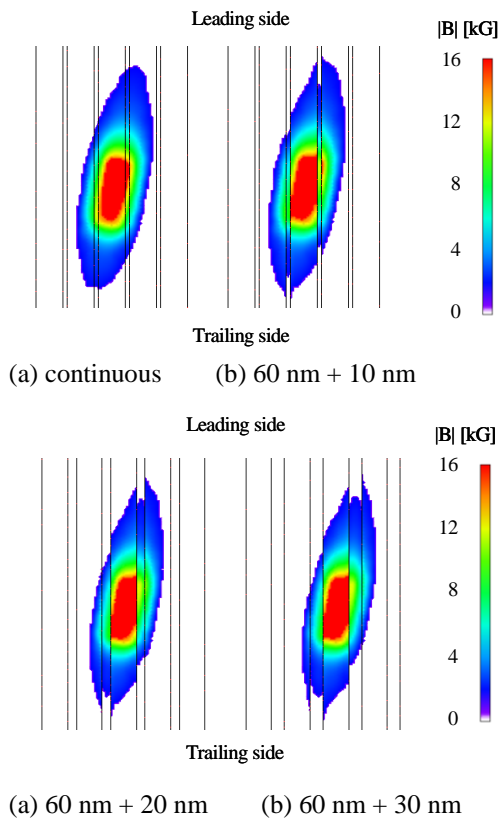
**Fig. 10** SNR vs. linear density for two ABS-SUL spacings. Average of three runs, 40 nm read track width.

#### 4 スキューを考慮した有限要素解析

これまでの，スキューが  $0^\circ$  の場合について述べてきたが，有限要素計算によりスキューが  $10^\circ$  の場合を検討する．前述のように，スキューが  $0^\circ$  の場合にもサイドイレース幅が 30 nm に達するので，ディスクリットトラック媒体[22]の導入は効果的であると思われる．ABS が逆台形の主磁極も効果的であることが報告されている



[23]が、ここでは考慮していない。図 11 に、ポール幅 60 nm のヘッド ABS の中心がディスクリートトラック媒体のランド部中心にあり、スキューが  $10^\circ$  と仮定した場合の記録磁界分布を示す。なお、媒体のランドに透磁率 2 を与え[24]、グループに透磁率 1 を与えてディスクリートトラック媒体を表現している。グループを広くとれば隣接トラックに及ぼす影響が少なくなることは自明であるが、同図からは 30 nm 程度のグループで十分であるように思われる。詳しくはマイクロマグネティクス計算を待たねばならない。ここで仮定した SPT ヘッドはポール幅 60 nm に対し、ポール厚さが 150 nm と厚いので、記録磁界がダウントラック方向に広がっていることが分かる。これを防ぐためには、トレーリングシールドのみならず、リーディング側にもシールドが必要であると思われる[16]。



**Fig. 11** Recording field distribution on the medium surface for continuous and discrete-track media for various groove widths. Head skew was  $10^\circ$ . Large side shields, without down stream shield,  $TH = 50\text{nm}$ ,  $MMF = 0.3\text{ AT}$ . The outer-most boundary of  $|B|$  is approximately 2 kG.

## 5 ヘッドおよび媒体の系全体を考慮した LLG マイクロマグネティクス解析

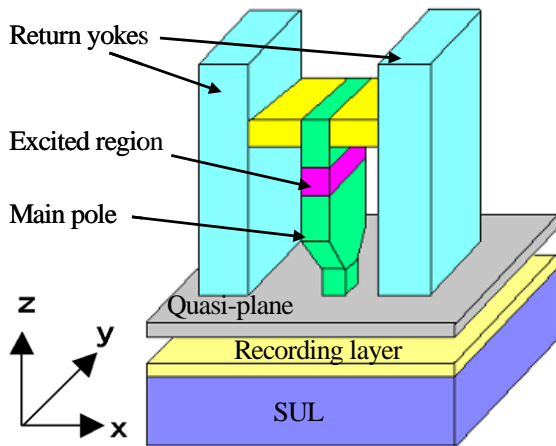
次に、構造を単純化した SPT ヘッドおよび 2 層媒体の系全体をモデル化し、LLG マイクロマグネティクス計算を行った。計算機能力の制約から媒体残留磁化を詳細に求めることは難しいが、サイドシールドの構造による記録磁界の時間応答、隣接トラックへの漏れ磁界などを求めることは可能であろう。

ここでは、図 12 に示すように、SPT ヘッドと媒体の間に仮想的な平面を仮定し、静磁氣的相互作用を媒介して計算する手法[25], [26]を用いた。励磁はコイルではなく、主磁極の励磁部に時間的に変化する磁界を印加する方法を用いた。

計算に用いた SPT ヘッドはポール幅 100 nm, ポール厚さ 180 nm, スロートハイト 100 nm, 主磁極-サイドシールド距離 60 nm, 媒体裏打層厚 100 nm, 記録層厚 20 nm とした。また、媒体の大きさをダウントラック方向 2560 nm, クロストラック方向 1280 nm とした。また、計算に用いた磁性体の材料特性を表 5 に示す。このような条件の下で系全体の磁性体を 20 nm の立方体に分割し、制動定数  $\alpha$  を 1.0, 1 ステップあたりの時間刻み幅を 4 ps として計算を行った。

図 13 に励磁に対する記録磁界の垂直成分の時間応答を示す。記録磁界は ABS から 7.5 nm の点（仮想的な平面内）で観測しており、SPT ヘッドと 2 層媒体からの磁界の和である。なお、0–0.2 ns まで負の一定値で励磁しているが、これにより初期条件による影響を排除した。励磁は 0.4 ns において負から正に反転しているが、記録磁界が負から正に反転するのはサイドシールドがない場合は 0.25 ns, ある場合は 0.3 ns 程度遅れ、サイドシールドにより記録磁界の時間応答もやや遅くなる。これは、主磁極の磁化がサイドシールドの影響で遅れて回転するためと思われる。また、図 14 には時刻 1.2 ns における記録磁界の垂直成分を媒体中のクロストラック方向に示した。同図から分かるように、サイドシールドにより主磁極付近では漏れ磁界が少なくなっているが、主磁極から遠い側の端部で強い磁界が観測されている。これは解析領域の制限から小さいサイドシールドを仮定したことによって生じた端部効果が原

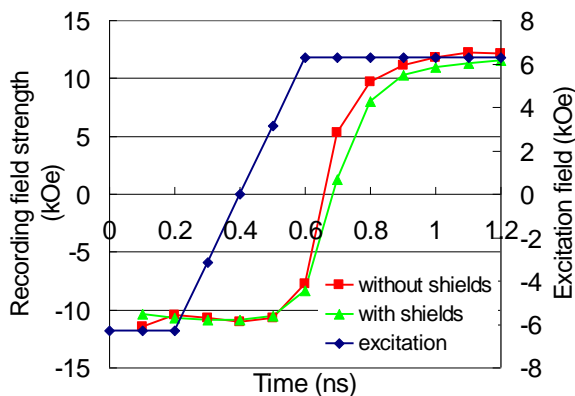
因であると思われる．実際にはより広い解析領域を取って検討することが重要である．さらに，より小さな立方体で分割すること，動的な現象を詳細に調べるために小さな制動定数を用いることも必要である．これらは全て計算時間に関わる問題であり，現状の計算でも1週間程度の計算時間が必要(Xeon, 3.0 GHz, 4 GB RAM)であるから，今後はさらに高速の計算アルゴリズムが必要であると思われる．



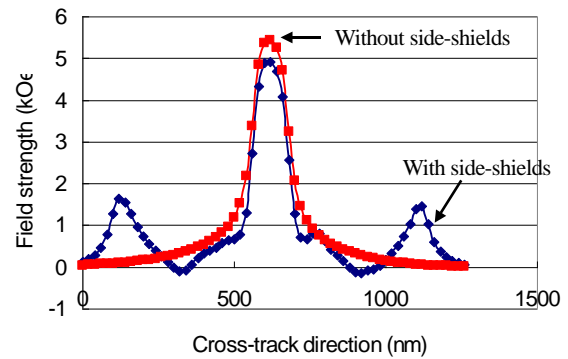
**Fig. 12** Schematic structure of SPT head. Side shields are not shown. ABS to quasi-plane = recording layer surface to quasi-plane = 7.5 nm.

**Table 5** Major specifications for SPT head with side shields and medium used for LLG calculations.

	SPT	SUL	Shields	Rec. layer
Ms emu/cc	1592	1432	1592	477
K erg/cc	3e4	3e4	3e4	1e6
A erg/cm	1e-6	1e-6	1e-6	0



**Fig. 13** Time variations of recording field in the recording layer for with and without side-shields.



**Fig. 14** Recording field distribution at  $t = 1.2$  ns in the recording layer with and without side-shields. Note that the magnetization of the medium is not included.

## 6 まとめ

有限要素法による CF-SPT ヘッド磁界計算と媒体の LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) マイクロマグネティクス計算により，面密度  $400 \text{ Gb/in}^2$  を仮定して，媒体残留磁化を求め記録トラック幅，サイドイレース幅，および S/N を導出した．その結果，サイドシールドはトラック密度を，トレーリングシールドは線記録密度を向上するために重要であることを述べた．また，有限要素計算によりスキューを考慮し，ディスクリットトラック媒体を導入した場合の効果についても検討し，記録磁界の広がりを防ぐ構造が必要であることを述べた．これらの構造はよりよい記録磁界分布を得るためではあるが，記録磁界強度を低下させると同時に記録ヘッドの構造を複雑にするから，得失を評価する必要がある．また，ヘッド構造ではないが，強い記録磁界を得るために ABS-SUL 距離を小さくすることは重要である．さらに，熱緩和の問題を避けると同時に現実的な記録磁界強度で飽和記録可能な媒体 [27], [28], [29] が期待される．

次に，構造を単純化した SPT ヘッドおよび 2 層媒体の系全体をモデル化し，LLG マイクロマグネティクス計算を行い，サイドシールドの構造による記録磁界の時間応答，および隣接トラックへの漏れ磁界などを求めた．マイクロマグネティクス計算でもサイドシールドは隣接トラックへの漏れ磁界を抑えるために効果的であるが，記録磁界の強度を低下させ，また応答を遅くすることが懸念されることを述べた．

## 謝 辞

2 節および 3 節の有限要素計算は新潟工科大学の名子昌次氏, 5 節の LLG マイクロマグネティクス計算は工学院大学の鈴木証朗氏および新潟工科大学の斉木昌彦氏の協力を得た。また, 日ごろより東北大学 IT センター 21 の皆様, SRC ヘッド部会の皆様には有益なご議論をいただいている。なお, 本研究の一部は文部科学省平成 14 年度科学技術試験研究 (RR2002, 超小型・大容量ハードディスクの開発), 日本学術振興会科学研究費補助金 C(2) (#15,560,311), および情報ストレージ研究推進機構 (Storage Research Consortium: SRC) の支援を受けた。また, 日本総合研究所からは有限要素解析ソフトウェア (JMAG-Studio) の提供を受けた。ここに記して深謝する。

## 参考文献

- [1] 東芝プレスリリース : [http://www.toshiba.co.jp/about/press/2004\\_12/pr\\_j1401.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2004_12/pr_j1401.htm)
- [2] MSJ 技術情報サービス : [http://www.wdc-jp.com/msj/technology/040825/040825\\_03.html](http://www.wdc-jp.com/msj/technology/040825/040825_03.html)
- [3] 村岡裕明 : 日本応用磁気学会第 135 回研究会資料, p. 1 (2004).
- [4] 三浦義正 : 信学技報, MR-2004-24 (2004).
- [5] H. Katada, T. Shimatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans.*, **38**, 2225 (2002).
- [6] K. Ise, K. Yamakawa, and K. Ouchi: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2520 (2000).
- [7] M. L. Mallery: *US Patent*, #4 656 546 (1987). M. L. Mallery and S. C. Das: *Reissued* #33 949, (1992).
- [8] K. Yamakawa, K. Ise, S. Takahashi, and K. Ouchi: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 163 (2002).
- [9] Y. Kanai, R. Matsubara, H. Watanabe, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 1955 (2003).
- [10] JMAG-Studio: <http://www.jri.co.jp/pro-eng/jmag/e/jmag/index.html>.
- [11] W. Scholz and S. Batra: *3rd North American Perpendicular Magnetic Recording Conference (NAPRMC 2004)*, Boulder, CO, U.S.A. (2004).
- [12] K. Takano: *ibid.*
- [13] T. Schrefl, M. Schabes, D. Suess, F. Dorfbauer, and O. Ertl: *ibid.*
- [14] Y. Kanai, S. J. Greaves, K. Yamakawa, H. Aoi, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **41** (2005) (in press).
- [15] Y. Nishida, H. Sawaguchi, A. Kuroda, H. Takano, H. Aoi and Y. Nakamura: *J. Magn. Magn. Mat.*, **235**, 454 (2001).
- [16] K. Miura, K. Yamakawa, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura: *9<sup>th</sup> Joint MMM-Intermag Conf.*, GD-06, Anaheim, CA, U.S.A. (2004).
- [17] Y. Kanai, H. Watanabe, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *J. Magn. Magn. Mat.* (2005) (in press).
- [18] A. Shukh: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2585 (2004).
- [19] S. J. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka: *IEEE Trans. Magn.*, **41** (2005) (in press).
- [20] R. Wood: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 36 (2000).
- [21] M. S. Patwari, S. Batra, and R. H. Victora: *Journal of Applied Physics*, **93**, 6543 (2003).
- [22] Y. Soeno, M. Moriya, K. Ito, K. Hattori, A. Kaizu, T. Aoyama, M. Matsuzaki, and H. Sakai: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 1967 (2003).
- [23] M. Mochizuki, Y. Nishida, Y. Kawato, T. Okada, T. Kawabe, and H. Takano: *J. Magn. Magn. Mat.*, **235**, 191 (2001).
- [24] R. H. Victora, J. Xue, and M. Patwari: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1886 (2002).
- [25] K. Yoshida and H. Yanagihara: *The Seventh Perpendicular Magnetic Recording Conference (PMRC 2004)*, 01pC-02 (2004).
- [26] 鈴木証朗, 吉田和悦 : 信学技報, MR-2004-5, (2004).
- [27] K.-Z. Gao and H. N. Bertram: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 704 (2003).
- [28] R. H. Victora and X. Shen: *15<sup>th</sup> Annual Magnetic Recording Conference (TMRC 2004)*, A1, Boulder, CO, U.S.A. (2004).
- [29] T. Shimatsu, H. Sato, T. Oikawa, Y. Inaba, O. Kitakami, S. Okamoto, H. Aoi, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **41** (2005) (in press).